



УДК 669.187.826

ДЕФОРМАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВА Ti–Ni С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ, ПОЛУЧЕННОГО СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

А. Ю. Северин, В. А. Березос, А. Н. Пикулин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведены экспериментальные работы по исследованию пластических свойств полученного на электронно-лучевой установке УЭ-208М слитка никелида титана 46 % Ti–54 % Ni диаметром 165 мм. Деформационную обработку проводили в две стадии. На первой деформировали на гидравлическом прессе при температуре 1050 °С заключенный в оболочку из низкоуглеродистой стали образец 20×20×150 мм. Благодаря тому, что после первой стадии обработки повышается технологическая пластичность материала, на второй стадии деформационная обработка может осуществляться уже при более низких температурах (600...900 °С) и по более «жестким» схемам. Посредством прокатки на второй стадии заготовки получили полуфабрикат необходимой геометрии. Деформированный полуфабрикат свидетельствует о перспективности использования электронно-лучевой технологии выплавки слитков сплавов на основе никелида титана, а сам факт получения полуфабриката — о высоком качестве литого слитка ЭЛП. Библиогр. 15, ил. 4.

Ключевые слова: эффект памяти формы; интерметаллид; никелид титана; электронно-лучевая плавка; слиток; оболочка; деформационная обработка; пластичность

Сплавы на основе интерметаллидов по своим физико-механическим свойствам существенно отличаются от сплавов на основе их компонентов, что позволяет создавать новые материалы с особыми механическими и функциональными характеристиками. Так, соединения титана и алюминия отличаются высокими значениями жаропрочных свойств, а эквивалентный интерметаллид титана и никеля (никелид титана) — эффектом памяти формы (ЭПФ) [1]. Сплавы на основе никелида титана разработали в 1965 г. в США. Они получили название нитинол. В этих сплавах ярко выражен эффект памяти формы, причем диапазон его температур можно регулировать с высокой степенью точности, вводя в сплав различные легирующие элементы. Сплавы отличаются хорошими характеристиками формозапоминания, имеют высокую прочность при более низком модуле упругости, чем у нержавеющей стали, а также высокую демпфирующую способность и коррозионную стойкость. Эти сплавы нашли применение в авиа- и судостроении (термомеханические соединения трубопроводов), космической технике (самораскрывающиеся антенны и солнечные батареи) и особенно в медицине (имплантаты и инструменты) [2–7]. Исследования показали, что

© А. Ю. СЕВЕРИН, В. А. БЕРЕЗОС, А. Н. ПИКУЛИН, 2015

они не токсичны, не имеют канцерогенного воздействия на окружающие ткани, характеризуются высокими значениями коррозионной стойкости и биологической совместимости в тканях живого организма [8].

Однако широкому применению сплавов на основе никелида титана препятствует их высокая стоимость, связанная со сложностью технологии производства и обеспечения требуемого уровня характеристик ЭПФ. Разработанная в середине 1990-х гг. технология получения полуфабрикатов из этих сплавов, включающая комбинированный способ плавки (гарнисажная плавка и последующий вакуумно-дуговой переплав), позволяла получать довольно большие слитки (до 700 кг) [9, 10]. Существенным недостатком таких литых сплавов была зональная и дендритная виды ликвации, из-за чего никелид титана становился горячеломким при обработке давлением. По этой причине температура, степень и скорость деформирования существенно снижались [11]. Все это существенно повышает себестоимость изготовления заготовок деталей и увеличивает затраты на доводочные работы. Таким образом, среди основных проблем, тормозящих широкое внедрение сплавов на основе никелида титана, от-



Рис. 1. Слиток никелида титана 46 % Ti–54 % Ni диаметром 165 мм, полученный способом ЭЛП

метим металлургические сложности получения однородных по химическому составу и структуре слитков данных сплавов; трудности деформации слитков для преобразования хрупкой литой структуры слитков сплавов на основе никелида титана.

Первую проблему удалось решить благодаря накопленному в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины большому опыту в области выплавки слитков интерметаллидов титана способом электронно-лучевой плавки (ЭЛП) [12, 13]. На электронно-лучевой установке УЭ-208М проведены опытные плавки слитков интерметаллидного сплава 46 % Ti–54 % Ni диаметром 165 мм [14] (рис. 1).

Настоящее исследование является продолжением ранее выполненных работ и показывает результаты деформационной обработки полученного способом ЭЛП сплава на основе никелида титана.

Согласно диаграмме титан–никель (рис. 2) сплав относится к однофазным. Соединение TiNi кристаллизуется из расплава при температуре 1310 °С и имеет область гомогенности 53...62 % Ni. Нагрев заготовки такого сплава для повышения пластических свойств можно проводить при температурах более 1000 °С, не опасаясь образования

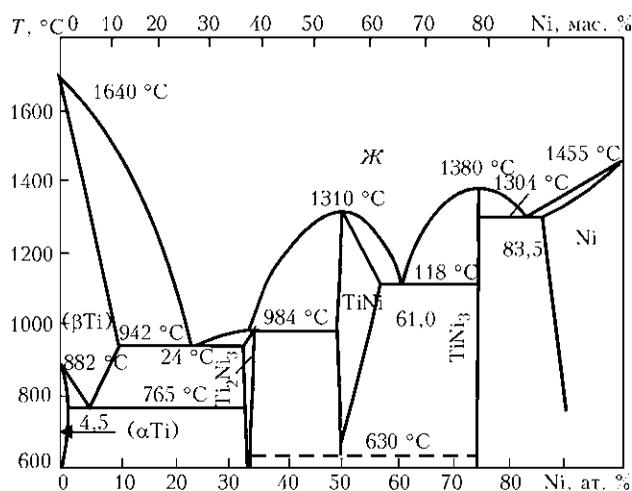


Рис. 2. Диаграмма состояния системы титан–никель

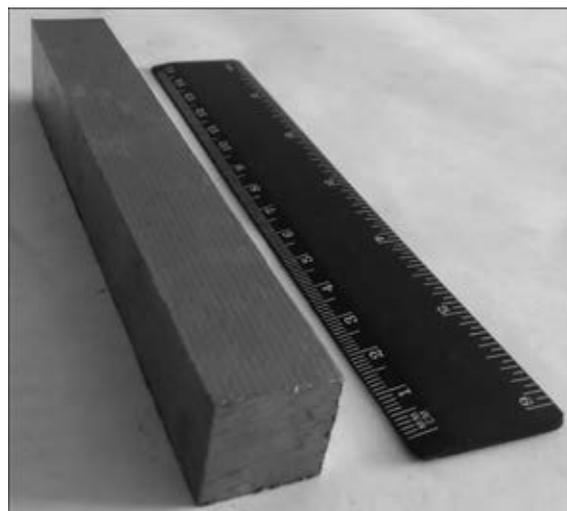


Рис. 3. Заготовка никелида титана размером 20×20×150 мм

жидкой фазы, в отличие от двухфазного сплава $Ti_2Ni + TiNi$.

Основной проблемой обработки давлением интерметаллидных титановых сплавов является их низкая технологическая пластичность, приводящая к возникновению высоких напряжений при деформации и полному разрушению материала.

Согласно ранее накопленному опыту [15] наилучшие результаты обеспечивает двухстадийная деформационная обработка интерметаллидных сплавов на основе титана. Поэтому на первом этапе обработки никелида титана основной целью является преобразование грубой структуры слитка и активация процессов пластификации для устранения по-

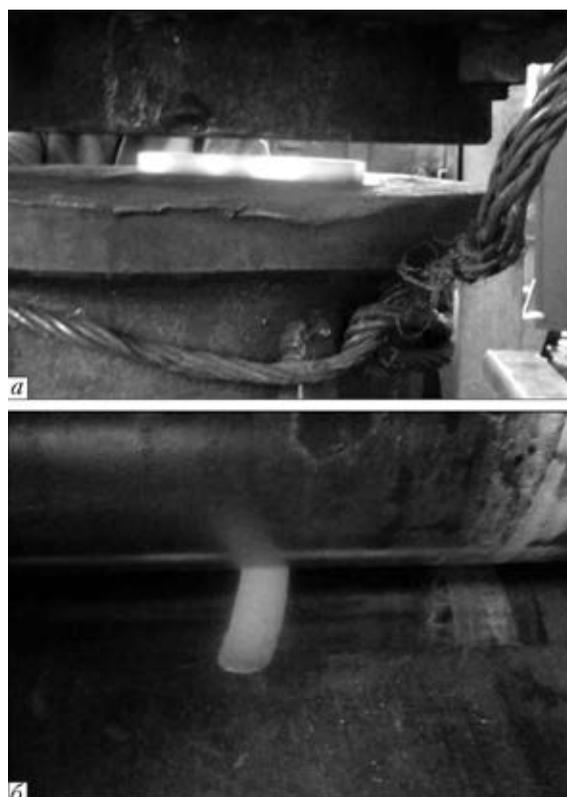


Рис. 4. Двухстадийная деформационная обработка никелида титана, полученного способом ЭЛП



вышенной хрупкости и увеличения технологической пластичности материала. Эта стадия обработки должна проводиться при довольно высоких для этих сплавов значениях температуры (1000...1050 °С) по «мягким» схемам. На второй стадии посредством прокатки заготовки получают полуфабрикат необходимой геометрии с максимально однородной структурой. Здесь деформационная обработка может осуществляться при более низких температурах (600...900 °С) и по более «жестким» схемам.

Вырезанную из слитка ЭЛП никелида титана заготовку размером (рис. 3) для предотвращения растрескивания и окисления поверхностного слоя поместили в оболочку из низкоуглеродистой стали толщиной 1,5 мм.

На первой стадии заготовку нагревали в электропечи сопротивления до 1050 °С и выдерживали 0,5 ч. Затем нагретую заготовку помещали между подвижным и неподвижным пуансонами гидравлического пресса и проводили опрессовку в двух взаимно перпендикулярных плоскостях со степенью деформации около 30 % (рис. 4, а).

Поскольку в процессе первой стадии деформации устранили повышенную хрупкость материала, на последующих этапах получения полуфабриката температуру деформации снизили до 900 °С. Заготовку прокатывали на реверсивном двухвалковом стане с общей степенью деформации около 80 % (рис. 4, б). Конечная толщина полученного полуфабриката составила 2,5 мм. После прокатки для снятия внутренних остаточных напряжений полученный полуфабрикат подвергали промежуточному отжигу (нагрев до 500 °С, выдержка 0,2 ч).

Таким образом, исследование новых способов получения и обработки полуфабрикатов из прецизионных функциональных материалов является актуальным, имеющим важное практическое значение. Изготовленный в ходе работы деформированный полуфабрикат свидетельствует о перспективности использования электронно-лучевой технологии выплавки слитков сплавов на основе никелида титана, а сам факт получения полуфабриката — о высоком качестве литого слитка ЭЛП.

The experimental works were carried out for investigation of ductile properties of 165 mm diameter ingot of titanium nickelide 46 % Ti–54 % Ni using the electron beam unit UE-208M. The deformational treatment was performed in two stages. At the first one the 20×20×150 mm specimen of low-carbon steel, enclosed into shell, was deformed in the hydraulic press. Due to the fact that after the first stage of treatment the technological ductility of material is increased, at the second stage the deformational treatment may be realized at the lower temperatures (600...900 °C) and using the more «severe» schemes. Using rolling of billet at the second stage, a semi-product of a required geometry was produced. The deformed semi-product proves the challenging application of electron beam technology of melting of ingots on titanium nickelide base, and the fact itself of producing the semi-product confirms the high quality of a cast ingot. 15 Ref., 4 Figure.

Key words: shape memory effect; intermetallic, titanium nickelide; electron beam melting; ingot; shell; deformational treatment; ductility

Поступила 04.11.2014

1. *Ordered Intermetallics — physical metallurgy and mechanical behaviors.* — Kluwer Academic Publishers, 1992. — 701 p.
2. Зеленов Б. А., Крылов Б. С., Лихачев В. А. Сплавы с управляемыми функциональными свойствами — прототип интеллектуальных материалов. В 3 ч. // *Материалы с эффектом памяти формы: Сб. I Рос.-амер. семинара и XXXI семинара «Новые физические и математические принципы в компьютерном конструировании материалов с эффектом памяти формы. Свойства материалов и их применение»* (13–17 ноября 1995). — СПб, 1995. — Ч. III. — С. 55–58.
3. Ионайтис Р. Р., Котов В. В., Туктэров М. А. Использование сплавов с памятью формы в ядерной энергетике // *Там же.* — Ч. II. — С. 133–134.
4. Рыклина Е. П., Морозова Т. В., Прокошкин С. Д. Биомедицинская инженерия в создании и применении нитиноловых эндопротезов с эффектом памяти формы // *Там же.* — Ч. II. — С. 51–54.
5. *Перспективы применения сплавов с эффектом памяти формы в робототехнике* / В. А. Лихачев, В. А. Лопота, Ю. К. Степанов, В. И. Юдин // *Там же.* — Ч. III. — С. 59–61.
6. Воронков А. В., Лихачев В. А. Исследование никелида титана в качестве рабочего тела управляемых демпферов // *Там же.* — Ч. I. — С. 83.
7. *The use of shape memory alloys in space building* / Yu. D. Kravchenko, V. A. Lichachev, A. I. Razov et al. // *Там же.* — Ч. I. — С. 58–61.
8. *Никелид титана. Медицинский материал нового поколения* / В. Э. Гюнтер, В. Н. Ходоренко, Ю. Ф. Ясенчук и др. — Томск: МИЦ, 2006. — 296 с.
9. Красовский П. Дослідження капілярних характеристик та плавка сплаву нікель-титан (NiTiNOL) з ефектом пам'яті форми // *Адгезія расплавов и пайка материалов.* — 2009. — Вып. 42. — С. 95–102.
10. *Влияние способа и технологии плавки на структуру и свойства слитков сплавов на основе никелида титана* / М. Ю. Коллеров, А. В. Александров, С. Ю. Кузнецов и др. // *Титан.* — 2011. — № 2. — С. 22–28.
11. *Формирование структуры сплава TiNi при деформации и термической обработке* / М. Ю. Коллеров, Д. Е. Гусев, А. А. Шаронов и др. // *Там же.* — 2010. — № 3. — С. 4–10.
12. Жук Г. В., Тригуб Н. П., Замков В. Н. Получение слитков γ -алюминиды титана способом ЭЛПЕ // *Современ. электрометаллургия.* — 2003. — № 4. — С. 20–22.
13. *Получение сплавов интерметаллида системы TiAl с добавками бора и лантана способом ЭЛПЕ* / Н. П. Тригуб, Е. А. Аснис, В. А. Березос и др. // *Там же.* — 2011. — № 3. — С. 10–12.
14. Березос В. А., Тригуб Н. П. Получение сплавов с эффектом памяти формы на основе титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // *Там же.* — 2011. — № 4. — С. 6–8.
15. *Влияние пластической деформации и термической обработки на структуру легированного двухфазного алюминиды титана, полученного способом ЭЛП, дополнительно легированного бором и лантаном* / Г. М. Григоренко, А. Ю. Северин, В. А. Березос и др. // *Титан.* — 2013. — № 3. — С. 4–8.